

Sistemas de Recuperación y Disipación de Energía Térmica en las Aguas Residuales: Una Alternativa Tecnológica al Confort Climático¹

Systems for Recovery and Dissipation of Thermal Energy in Wastewater: A Technological Alternative to Climate Comfort.

Orlando Miguel Morales Andrade²

Recibido: 12-07-2017 Aceptado: 16-08-2017

1 Artículo resultado de investigación como gestor de tecnologías virtuales.

2 Colombiano, Ingeniero Electrónico. Gestor de Tecnologías Virtuales. E-mail: ommorales@sena.edu.co

Resumen

Este artículo revisa y expone las características técnicas, limitaciones y potencialidad de los sistemas de recuperación y disipación de energía térmica en las aguas residuales como tecnología para brindar confort climático. Presenta también un análisis de la viabilidad técnica y financiera basándose en criterios extraídos de diversos casos de estudio realizados a nivel mundial traídos al contexto local colombiano.

Palabras Clave: Alcantarillado, Bomba de calor, Eficiencia Energética, Intercambiador de Calor, Reciclaje de la Energía.

Abstract

This article reviews and illustrate the technical characteristics, limitations and potentiality of the heat rejection and heat recovery systems from the sewer applied to climate comfort. Also presents a technical and financial feasibility analysis based on criteria extracted from diverse worldwide studies of the topic adapted to the local context of Colombia.

Keywords: Energy Efficiency, Energy Recycling, Heat Pump, Heat Exchanger, Sewer.

Introducción

En cada zona urbana del mundo, el calor que los seres humanos hemos generado para climatizar nuestras duchas, lavar nuestra ropa, cocinar, entre otras actividades, hacen de nuestras aguas residuales el más grande sumidero de energía térmica de nuestras edificaciones; a esta carga térmica se suman también las descargas sanitarias y los diferentes vertimientos industriales al desagüe (Luccio, 2012).

Durante las últimas décadas, diversos estudios han estimado la energía térmica contenida en aguas residuales. Entre estos estudios, Kaufman (2012) estima que cerca de 350 billones de kilovatios hora de energía térmica son tirados a la alcantarilla en los Estados Unidos de América (USA) cada año, el equivalente de energía necesario para abastecer 30 millones de casas estadounidenses. En Suiza, se calcula que la energía térmica perdida en el sistema de alcantarillado son aproximadamente 6 billones de kilovatios hora por año, que en términos de la demanda total de calefacción de espacios y suministro de agua caliente representa el 7% (Kaufman, 2012).

Otros estudios realizados en Europa, han afirmado que el 5% de la infraestructura civil total está en capacidad de ser climatizada si se miraran las aguas residuales del alcantarillado simultáneamente como un sumidero y fuente en bruto de energía térmica (Frijns, Hofman, & Nederlof, 2013).

Esto ya está pasando. Las primeras instalaciones se construyeron ya hace más de 20 años, siendo Suiza pionera gracias a su programa de energía establecido en 1993, que incluye el uso térmico de la alcantarilla. Hoy, cerca de 500 sistemas de bombeo de calor de las alcantarillas están en operación alrededor del mundo con rangos térmicos que van desde 10KW a 20MW (Schmid, 2008). Ejemplo de ello es la estación de tren de Beijín, inaugurada en Agosto de 2008 y considerada a la fecha como la edificación más grande que implementa un sistema combinado de recuperación de calor geotérmico y de la alcantarilla (Cipolla & Maglionico, 2014). En el 2010 en la ciudad de Vancouver empezó a operar

un sistema distrital conocido por sus siglas en inglés como NEU (Neighbourhood Energy Utility), el primer sistema que desplazaba el uso de combustibles fósiles mediante la captura de calor de las aguas de alcantarilla en Norte América. Este modelo fue inspirado por dos facilidades que ya están en operación en Oslo y otra en Japón y fue adaptado a las condiciones presentes en Vancouver (Lee, 2015).

Se estima que con la consolidación de estas tecnologías y otras en eficiencia energética, se logre ahorrar un tercio de la energía demanda mundialmente para el año 2050 (Agency, 2012), (Chen, 2012), al mismo tiempo que como afirma Aye (2007) las emisiones de CO₂ al medio ambiente se reducen en un 35 a 50%, consecuencia del desplazamiento del uso de combustibles fósiles utilizados.

Marco Teórico

Existen varias opciones para la producción de energía a partir de las aguas o lodos residuales, como: digestión anaeróbica, co-incineración, producción de materiales de construcción, pirolisis, gasificación, oxidación supercrítica, hidrólisis a alta temperatura, producción de hidrogeno, acetona, butanol o etanol y la generación de electricidad a partir del uso de micro-organismos específicos (Rulkens, 2007). Sin embargo, este artículo se centra en el aprovechamiento de la energía térmica contenida en los efluentes de las alcantarillas y su potencial como sumidero térmico.

Para la consecución de este propósito, tres componentes principales son requeridos: 1. Intercambiador de calor, 2. Bomba de calor, 3. Sistema de suministro calor/frío.

Intercambiadores de Calor

Los intercambiadores de calor son ampliamente usados en diferentes industrias, con tamaños y materiales que varían de acuerdo con la aplicación. Un intercambiador de calor estándar pasa por sus tuberías un fluido de trabajo; usualmente agua fría o refrigerante con altas propiedades de transferencia térmica. Estas

tuberías están inmersas en el efluente de aguas residuales el cual, usualmente fluye en dirección contraria al fluido de trabajo permitiendo que la energía térmica se transfiera de un fluido al otro sin que exista contacto entre ellos (Gray, 2013).

Un intercambiador de este tipo puede ser instalado dentro de una alcantarilla existente así como también puede estar integrado de fábrica con el alcantarillado o colocado en un pozo o acumulador al cual llega un flujo previamente filtrado o desviado del flujo principal del

alcantarillado (F Pamminger, 2013). Esta última alternativa garantiza un nivel constante en el sistema y reduce el espacio de aire entre el fluido y las paredes del ducto, reduciendo la influencia de uno de los parámetros con mayor sensibilidad que afecta la temperatura de las aguas residuales, parámetro, cuyo grado de sensibilidad se asemeja a la temperatura de los sólidos presentes y a la intermitencia del fluido. Las configuraciones previamente descritas son presentadas seguidamente en la Figura 1.

Figura 1: Intercambiador embebido (Waste & Water Treatment, 2011), Intercambiador de calor por módulos (GmbH, 2011), Intercambiador de calor en un pozo (Hickland, 2015).



Fuente: 1. Waste & Water Treatment (2011), 2. GmbH (2011), 3. Hickland (2015).

Los intercambiadores de calor actuales incorporan componentes con materiales de alta calidad como aleaciones de acero inoxidable que han mejorado la conductividad térmica en un orden de hasta tres veces respecto a intercambiadores de la década pasada, esto permite alcanzar tazas de captura de potencia térmica de aproximadamente 6-9 KW/m² mientras que previos sistemas solo alcanzaban los 2-3 KW/m² (Waste & Water Treatment, 2011). Sin embargo, el costo de estos intercambiadores es elevado respecto a los intercambiadores de calor fabricados de cobre. El cobre es considerado

un material sostenible debido a que se puede reciclar en su totalidad sin perder sus propiedades iniciales, no es tóxico, presta una vida útil de más de 10 años e igualmente ha sido optimizado para obtener mayor desempeño a menor uso de material de fabricación (Badia Constantí, 2013).

Desempeño de un Intercambiador de Calor

La tabla 1 evalúa de 1 a 10 los tipos de intercambiadores de calor acorde a su desempeño

Tabla 1: Evaluación de Tipos de Intercambiador de Calor

FACTOR	TIPOS DE INTERCAMBIADOR		
	Platos	Tubo y Coraza	Doble Tubo
Transferencia de Calor	10,0	9,0	8,0
Costo	6,0	8,0	10,0
Poder de Bombeo	6,0	7,0	10,0
Mantenimiento	10,0	6,0	8,0
Accesorios y Peso	8,0	8,0	10,0
Promedio	8,0	7,6	9,2

Fuente: Modificado de Badia Constantí, (2013).

en los sistemas de recuperacion/absorcion de calor en las alcantarillas.

Uno de los principales problemas que reducen la expectativa de vida de un intercambiador de calor, es la acumulación de sedimentos en la superficie de los tubos. La tasa de transferencia de calor se reduce debido a la resistencia térmica creada por la formación de estas capas aislantes. Esto representa la falla más común del sistema por lo que es querido un mantenimiento periódico (Shahryar Garmsiri, 2014).

La eficiencia de un un intercambiador de calor, E , puede ser usada para determinar la temperatura de salida del intercambiador dadas las condiciones de entrada en éste. Esto lo ilustra la ecuación [1].

$$E = \frac{\text{Actual Heat Transfer}}{\text{Maximum Possible Heat Transfer}} = \frac{T_{h,in} - T_{h,out}}{T_{h,in} - T_{c,in}} \quad [1]$$

En donde:

$T_{h,in}$:Temperatura de entrada del agua proveniente del alcantarillado.

$T_{h,out}$:Temperatura del agua que ha pasado a través del intercambiador.

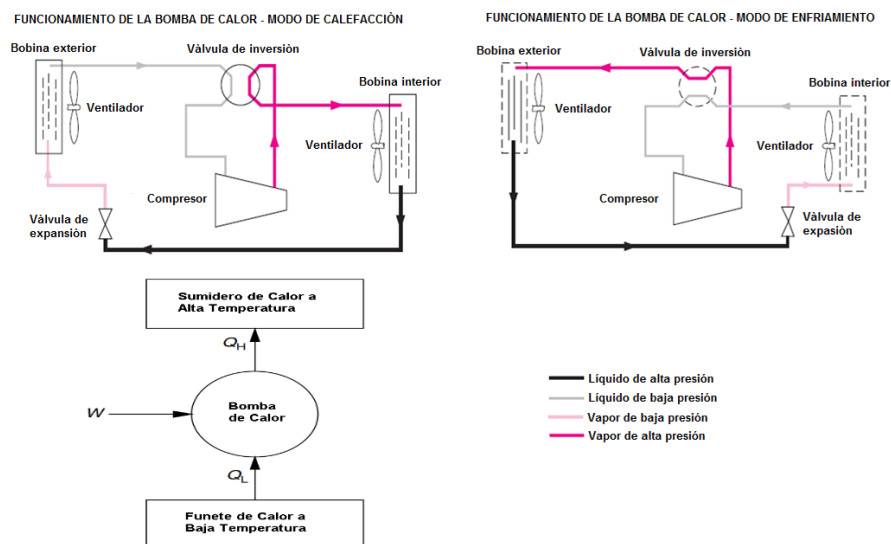
$T_{c,in}$:Temperatura del fluido de entrada (Cengel, 2007).

Bombas de Calor

Existen 4 tipos de bombas de calor: 1. Termoeléctrica, 2. De absorción, 3. De gas Comprimido y 4. De Compresión de Vapor. Actualmente, casi todas las bombas de calor en operación son del tipo ciclo de compresión de vapor o de absorción (Agency, 2015). Las bombas de calor, capturan energía térmica de fuentes con bajo grado de calor, tales como el suelo, el aire, lagos, ríos o las aguas residuales y las transfieren a un nivel de temperatura mayor. Adicionalmente, las bombas de calor pueden operar en modo enfriamiento o en modo calentamiento. La Figura 2 ilustra ambas configuraciones para una bomba de calor de ciclo de compresión de vapor.

La bomba de calor en principio integra 4 dispositivos: Un compresor, un condensador, una válvula de expansión y un evaporador (Cengel, 2007). En la primera etapa, el fluido a baja presión es comprimido por el compresor aumentando su temperatura y presión llevándolo a estado gaseoso, luego en el condensador el vapor libera su energía térmica, la entropía de este cambia y su estado retorna a líquido; este proceso se lleva a cabo a presión constante. La siguiente fase se lleva a cabo en la válvula de expansión en donde se da una caída de presión y luego una caída en la temperatura del fluido, éste es el punto donde el fluido se encuentra a más baja temperatura. En la

Figura 2: Bomba de calor en operación



Fuente: Cengel (2007)

etapa final, el fluido alcanza el evaporador, el fluido se somete a transferencia de calor con la fuente de calor presente en el evaporador cambiando su entropía y luego su estado a gaseoso en un proceso isobárico (presión constante).

Desempeño de una Bomba de Calor

El desempeño de la bomba de calor es determinado por el coeficiente de desempeño o COP por sus siglas en inglés (Coefficient of Performance) que representa la relación entre el calor suministrado en el punto de entrega y la energía eléctrica usada en el compresor. Este parámetro puede expresarse en función de las temperaturas de entrada y salida en la bomba de calor de la siguiente manera:

$$COP = \frac{|Q_H|}{W} = E \times \frac{T_1}{T_1 - T_2} \quad [2]$$

Dónde: QH es el calor removido del reservorio a alta temperatura (modo enfriamiento) o el calor entregado al reservorio de baja temperatura (modo calentamiento). E es constante de diseño de la bomba de calor. T1 y T2 son respectivamente la temperatura en condensador y en el evaporador.

Es pertinente aclarar que el COP en modo de calentamiento difiere del modo de enfriamiento según las condiciones térmicas del sumidero y de la fuente de calor más el calor disipado en el compresor. Como ilustración mas detallada de esto, Zhao, Fu, Zhang, Jiang, and Lai (2010) investigaron el desempeño de las bombas de calor de acuerdo al modo de operación calentamiento o enfriamiento bajo condiciones específicas de funcionamiento en un sistema urbano que incluye una bomba de calor, un intercambiador de calor, filtro de suciedad y otros dispositivos. El sistema analizado ha estado funcionando desde el 2008. Los investigadores probaron el sistema cambiando diferentes parámetros como el flujo y la temperatura de las aguas residuales para cada uno de los modos de operación de la bomba de calor además de variaciones en la demanda. Los resultados fueron luego compilados para analizar el COP característico de cada modo de operación y la eficiencia, con el fin de realizar algunas mejoras al sistema. De los resultados obtenidos

se obtuvo un COP de 4.3 en modo calentamiento y de 3.5 en modo de enfriamiento. Estos valores de COP son útiles como referencia para diseñar o evaluar sistemas similares (transporte de energía térmica) y no deben confundirse con los índices de eficiencia de los sistemas de generación-transformación de energía térmica - eléctrica, cuyos valores máximos registrados solo alcanzan los 0.6 en ciclo combinado (turbina de gas y turbina de vapor) (Siemens, 2012). Siempre, se deberán analizar parámetros como el flujo del agua residual y el gradiente de temperatura, puesto que estos pueden variar según las condiciones climáticas y en consecuencia el dimensionamiento de las bombas de calor deben considerar estas fluctuaciones (Tassou, 1988).

Sistema de Suministro de Calor/Refrigeración

Describe a todos los dispositivos entre la bomba de calor y el punto de demanda. Estos dispositivos son principalmente, bombas de agua, ventiladores radiadores, ductos de distribución, tuberías con recubrimientos de aislamiento térmico y puntos de almacenamiento térmico; su función es garantizar la entrega del calor recuperado del alcantarillado con la menor pérdida. Para mantener condiciones de mínimas perdidas térmicas lo anterior aplica para distancias entre la fuente térmica y la demanda entre un máximo en el rango de 250m a 300m (Rabtherm, 2010).

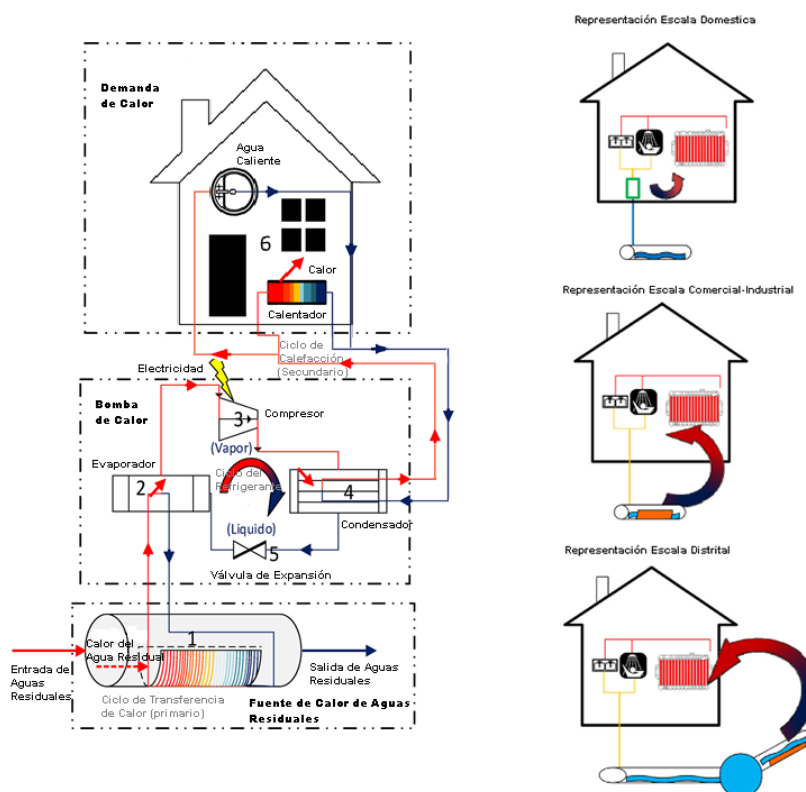
Clasificación De Sistemas

Las aplicaciones se pueden clasificar en tres categorías de acuerdo a la escala y ubicación del proyecto. La primera categoría corresponde a proyectos a pequeña escala como sistemas instalados en los desagües de los hogares. La segunda categoría son proyectos a mediana escala como aquellos sistemas ya instalados en el sistema de alcantarillado que involucran un vecindario, centros comerciales o edificaciones. La tercera categoría son los proyectos a gran escala, los cuales involucran una variedad de procesos a lo largo del sistema de alcantarillado y principalmente en la planta de tratamiento de aguas residuales,

cubriendo necesidades a nivel de grandes comunidades o ciudades enteras (F Pamminger, 2013). La Figura 3 muestra el esquemático de un sistema completo de recuperación/absorción de calor para calefacción; el modo de enfriamiento sigue la lógica de la Figura 2. Una ilustración de un sistema a pequeña, mediana y en transición a gran escala, se presenta en la Figura 4.

Los sistemas de recuperación/absorción de calor a pequeña escala o domésticos pueden clasificarse en dos sistemas: intercambiadores de calor por demanda e intercambiadores de calor combinados con almacenamiento (Jan Sievers, 2014). Los primeros solo pueden recuperar calor bajo condiciones de flujo continuo, como los "intercambiadores de calor para duchas" los cuales han sido diseñados para recuperar energía térmica

Figura 3: Esquemático de un Sistema de Recuperación/Absorción de calor de Aguas Residuales



Fuente: Modificado de Culha, Gunerhan, Biyik, Ekren, & Hepbasli (2015).

del desagüe doméstico con una recuperación de hasta 45% del calor desechado. Los segundos incorporan un sistema de almacenamiento térmico lo que representa una respuesta rápida en el aporte a la recuperación de energía térmica ya que evita fuertes fluctuaciones térmicas (Markham, 2014). Como el calor es recuperado, menor energía es luego requerida para calentar el agua a consumir, este es el caso de Holanda en donde el 40% del gas usado en las duchas llega a ser ahorrado gracias a la implementación de este sistema (Frijns et al., 2013).

En la actualidad no existen sistemas que reúnan las características enunciadas por F Pamminger (2013) para ser de gran escala. Sin embargo, existen varios sistemas de mediana escala en operación, uno de los más grandes se encuentra el Southeast False Creek Neighbourhood Energy Utility en Vancouver. Una facilidad que está en capacidad de generar suficiente energía para satisfacer 7.000 unidades residenciales mediante la combinación de dos sistemas: El sistema de recuperación de calor del alcantarillado distrital representa el 70% de la producción de energía

Por otra parte, cualquier alteración hecha por el sistema de recuperación/disipación de calor en la red de alcantarillado no debe afectar negativamente el desempeño del tratamiento final de aguas residuales, ni su mantenimiento. Por lo anterior, cuando se usa el alcantarillado como fuente de calor, la temperatura de las aguas residuales de este no debe descender por debajo de los 10°C. La razón radica en que la metabolización de microorganismos anaeróbicos metanogénicos psicófilos se hace muy lenta a temperaturas inferiores a 10°C (Lettinga, Rebac, & Zeeman, 2001).

Hay menos cuidados respecto a la temperatura que las aguas residuales pueden alcanzar cuando el calor es disipado a ésta ya que los distintos tipos de Metanógenos (psicófilos, mesófilos y termófilos) tienen temperaturas óptimas distintas en las que pueden digerir los lodos más rápidamente, sin embargo, la temperatura final de la alcantarilla debe ser siempre controlada; la razón técnica principal es que a temperaturas elevadas se generan mayores cantidades de H₂SO₄; componente corrosivo para alcantarillas convencionales de concreto. Por

regulación, en Colombia los vertimientos, según la resolución 0631 del 17 de Marzo de 2015 están limitados a una máxima temperatura de descarga de 40°C (Ambiente, 2015).

Viabilidad Financiera

Aunque los estudios de locación indiquen que existe potencial técnico y ambiental para el desarrollo y la implementación de estos sistemas, la viabilidad financiera, es el análisis que tiene la última palabra.

Costo Capital o Costo de Inversión

La cifra exacta de la inversión siempre variará según el caso ya que las características difieren en cada situación. En la tabla 2 se muestra una estimación aproximada de los componentes del sistema. Con base en estos costos, se calcula y evalúa en términos generales el costo total de la inversión para todos los casos.

Para la mayoría de componentes mostrados en la tabla 2, los costos son altamente dependientes del requerimiento de la potencia térmica del sistema. De acuerdo a esto, se

Tabla 2: Estimación Aproximada del Costo de Inversión (Niphuis, 2013)

COMPONENTE	COSTOS DE INVERSIÓN	POR UNIDAD
Dependiente de la Potencia Requerida	\$5,043,103.45	KW
Intercambiadores de Calor (Alcantarillado)	\$2,758,620.69	KW
Intercambiadores de Calor (Bomba de Calor)	\$68,965.52	KW
Bomba de Calor	\$689,655.17	KW
Conexión Eléctrica	\$77,586.21	KW
Tanque de Almacenamiento	\$362,068.97	KW
Sistema de Control	\$241,379.31	KW
Bombas Hidráulicas	\$482,758.62	KW
Trabajos de Tubería	\$362,068.97	KW
Dependiente de la Distancia	\$1,086,206.90	m
Tubería (Transferencia de Calor)	\$1,086,206.90	m
Costo Fijo	\$103,448,275.86	-
Software	\$68,965,517.24	-
Construcción de Facilidades	\$34,482,758.62	-
AIU	15%	-
Ingeniería	15%	-
Costo de Operación: Industrial	\$6,896,551.72	Año
Costo de Operación: Residencial	\$6,896,551.72	Año

clasifican como “dependientes de la potencia requerida”. Adicionalmente, los costos clasificados como “dependientes de la distancia” hacen referencia a la dependencia de la distancia entre los intercambiadores incorporados en la alcantarilla y las facilidades. Se asume que los costos de construcción civil y software requerido son independientes de las características del sistema luego se clasifican como “costos fijos”. Se considera también un AIU del 15% asumido para costos de ingeniería.

Se incluye el incentivo tributario que deduce el 50% de la inversión y que es otorgado por la ley 1715 de 2014 a proyectos renovables y de eficiencia energética.

Costo Operacional

Como segundo aspecto, tenemos los costos operacionales, los cuales hacen referencia a los gastos de mantenimiento y a los gastos de energía requerida para potencializar el sistema (Gas o electricidad). Estos deben ser considerados por el tiempo de vida útil del equipo (15 años aproximadamente).

Comparados con los sistemas convencionales de confort climático (calefacción/enfriamiento) la incorporación de estos sistemas trae consigo más componentes incrementando el costo de mantenimiento. Este costo es estimado anualmente en \$6'896.551.72 pesos Colombianos.

Por otra parte, se estima que la necesidad térmica para un hogar Colombia es de 50GJ y el consumo térmico del país de 0.5GJ/m² (Niphuis, 2013). Lo anterior resulta en demandas energéticas entre 1000GJ y 10,000GJ por año. En la tabla 3 se presentan los precios actuales promedio de la energía eléctrica en Colombia tanto para el sector industrial como para el residencial según previas consideraciones y la tabla 4 presenta el costo de entregar 1 GJ de energía térmica basado en los costos de la tabla 3. El ahorro presentado responde a una consideración del 45% frente a sistemas convencionales según casos de estudio a nivel mundial y datos presentados previamente.

Los precios de suministro de gas y

Tabla 3: Precio Actual de la Energía Eléctrica

CATEGORÍA	DEMANDA DE CALOR	ELECTRICIDAD (\$/KWH ⁻¹)
Residencial	± 50 GJ	\$420
Industrial	1.000 - 10.000 GJ	\$380

Tabla 4: Costo de Entregar 1GJ de calor, basado en el precio actual de la Electricidad

CATEGORÍA	SISTEMA CONVENCIONAL ELÉCTRICO	AHORRO
Residencial	\$116,666.67	\$52,500.00
Industrial	\$105,555.56	\$47,500.00

electricidad necesarios como potencializadores y respaldo del sistema varían a lo largo del país condicionando así el desarrollo y el mercado (F Pamminger, 2013). Un ejemplo de esto afirma el fabricante Rabtherm, es Australia, que en similitud con Colombia presenta dificultades en la viabilidad financiera de un sistema de calefacción del tipo aquí tratado (Excluye Enfriamiento y calentamiento eléctrico), debido a los bajos costos del gas natural del país. Por tal razón es menos costoso construir un sistema de calefacción a gas natural convencional que instalar y operar un sistema de acondicionamiento climático basado en la recuperación/disipación térmica en las aguas residuales de la alcantarilla. La fábrica afirma que si existiese un incremento de más de 260% en el precio del gas natural comparado a los valores del 2013 el sistema podría volverse económicamente viable en este caso. Considerando que con el tiempo, las tecnologías se vuelven cada vez menos costosas, la viabilidad financiera de estos sistemas podría ocurrir antes que el alza de precios del gas ocurra. Por el contrario, en Europa, el precio del gas natural es elevado y esto representa una gran oportunidad para los sistemas aquí mencionados (YCharts, 2015).

Período de Retorno Financiero

Debido a que la inflación afecta el periodo de retorno de estos sistemas, el valor presente de los reembolsos futuros es menor que su valor futuro. Por tal razón, los ahorros futuros tendrán también un valor presente menor. Una tasa de descuento del 5.25% es asumida para traer los valores futuros de estos ahorros a valor presente (Economics,

2017).

Según Aye (2007) el tiempo de vida de estos sistemas ronda alrededor de los 15 años; recobrar la inversión dentro de este tiempo es un factor decisivo. Es esperado que se obtengan diferencias en los periodos de retorno de los sistemas residenciales y los industriales, principalmente por la diferencia en los precios de la energía y la escala del proyecto por obvias razones. Por esta razón, estas dos categorías se analizan por separado.

Para este tipo de sistemas, se consideró una demanda térmica de 0.5GJ/m². El sistema requiere de una bomba de calor con una potencia de 25.25W/m²(Rabtherm, 2010). La distancia entre el cuarto de equipos y los intercambiadores instalados en la alcantarilla es asumida de 100m. Combinando estas características con las de la tabla 2, se obtiene el costo total de la inversión para edificaciones industriales de varios tamaños. Estos resultados se muestran seguidamente en la tabla 5.

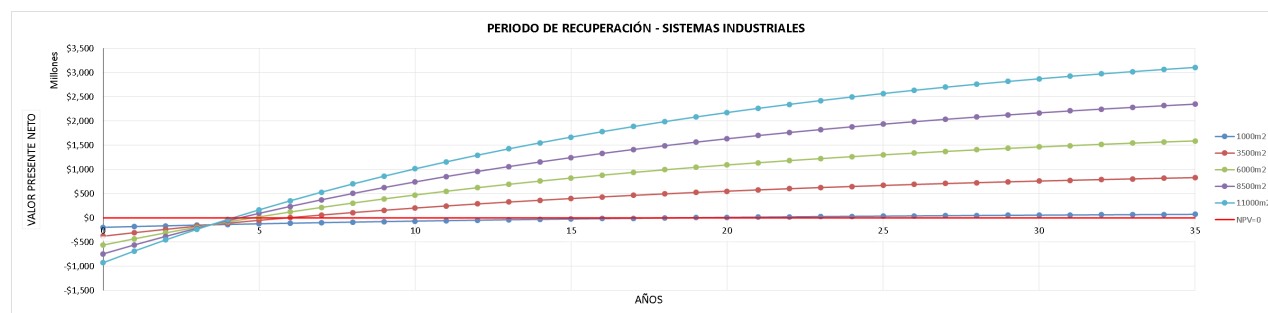
Tabla 5: Costo Total de Inversión para edificaciones de varios tamaños

INDUSTRIAL				
Área [m ²]	Demanda Térmica [GJ]	Potencia Térmica [kW]	Distancia [m]	Costo Capital [COP\$]
1000	500	25.25	100	\$390,318,426.72
3500	1750	88.375	100	\$756,416,217.67
6000	3000	151.5	100	\$1,122,514,008.62
8500	4250	214.625	100	\$1,488,611,799.57
11000	5500	277.75	100	\$1,854,709,590.52

Combinando los costos de inversión con la reducción en los costos de energía, los costos de mantenimiento y la tasa de descuento anual, se

obtiene el valor presente neto para cada escala de proyecto. Esto es presentado en la figura 5.

Figura 5: Valor Presente Neto para Sistemas del tipo Industrial



Para los sistemas que abarquen las áreas aquí consideradas, el Valor Presente Neto empieza a ser positivo a partir del 5to año hasta el 19avo año de operación. Debido a que la expectativa de

vida de estos sistemas es de 15 años, la viabilidad financiera de proyectos menores a 2500m² es cuestionable. (Niphuis, 2013) (Rabtherm, 2010)

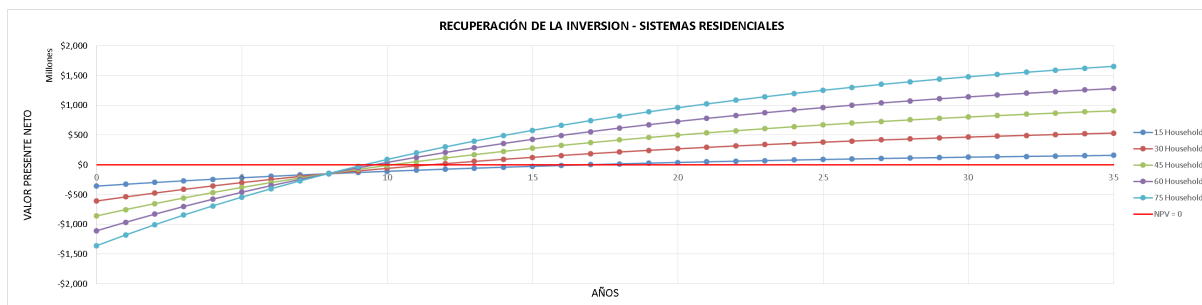
Tabla 6: Costo Total de Inversión para unidades residenciales

RESIDENCIAL				
Residencias	Demanda Térmica [GJ]	Potencia Térmica [kW]	Distancia [m]	Costo Capital [COP\$]
15	750	37.95	300	\$713,800,538.79
30	1500	75.9	525	\$1,214,950,215.52
45	2250	113.85	750	\$1,716,099,892.24
60	3000	151.8	975	\$2,217,249,568.97
75	3750	189.75	1200	\$2,718,399,245.69

Con los anteriores costos de inversión, incluyendo el ahorro en costos de energía, el costo de mantenimiento, y la tasa de descuento anual del 5.25% los resultados del Valor Presente Neto son presentados en la figura 6

La figura 6 indica que al considerar los diferentes grupos de unidades residenciales, los periodos de retorno de la inversión se ubican en el rango de 10 a 17 años. Lo que muestra que los proyectos para menos de 15 unidades residenciales son actualmente inviables.

Figura 6: Valor Presente Neto para Sistemas del tipo Residencial



Conclusiones

Debido a que las tecnologías de recuperación de calor aún están en etapa de desarrollo y el precio del gas natural es bajo, el limitante principal lo encabeza su costo. Por otra parte y por lo general, el calor residual es de baja temperatura, con el fin de utilizar el calor residual de manera más eficiente, el intercambiador de calor tiende a ser más grande para que pueda recuperar más calor de las aguas residuales lo que aumenta el costo capital sumando el mantenimiento del equipo (Andrews & Pearce, 2011).

Actualmente en Colombia, muchas ciudades no cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales y las existentes, carecen de un sistema de monitoreo continuo de las aguas residuales en diferentes puntos del sistema de alcantarillado, lo cual es requerido para el manejo en tiempo real de desbordamientos y necesarios para estudiar y construir el perfil térmico a lo largo de las líneas de alcantarilla, base fundamental para identificar la ubicación o lugares convenientes que dan viabilidad técnica a esta tecnología (Fuchs & Beeneken, 2005) (Gruber, Winkler, & Pressl, 2005). Esto crea la necesidad y el desafío técnico de realizar mediciones apropiadas durante un evento de tiempo y duración tal que estos datos sean significativos para modelar con la mayor precisión múltiples comportamientos durante el año como proceso de planificación del proyecto (Meggers & Leibundgut, 2011).

El tipo de sistema de alcantarillado determina la complejidad de establecer un perfil térmico y de la estabilidad del recurso (Richard Ashley, 2002). Un sistema de alcantarillado independiente maneja sus efluentes por ductos separados mientras que uno combinado, recoge las aguas lluvias, las aguas negras y grises provenientes de las casas y las industrias en un solo ducto. Luego, la variabilidad de las lluvias afecta drásticamente las condiciones térmicas en sistemas combinados (Kretschmer, Simperler, & Ertl, 2016). Además, las condiciones térmicas de regulación deben cumplirse para que los procesos biológicos y de sanidad llevados a cabo en la PTAR no sean afectados.

En el análisis de viabilidad financiera presentado en este artículo, al prescindir del incentivo tributario del 50% sobre la inversión, el rango de periodo de retorno se extiende por 5 años más para el caso de los proyectos de tipo industrial, dando viabilidad solo a proyectos superiores a 6000m². Mientras que los sistemas de tipo residencial se hacen totalmente inviables ya que el rango del periodo de retorno se da a partir de los 25 años en adelante, superando así la expectativa de vida útil del sistema. En la mayoría de aplicaciones, el costo de operación se presenta como una desventaja frente a otros sistemas de confort climático ya que añade más componentes, y cuantos más elementos del sistema provengan de fuentes o fabricantes en el exterior, esto eleva los costos, debido a la mano de obra extranjera,

transporte, capacitación, soporte técnico y tiempos de entrega. Esto no se consideró en el análisis de viabilidad financiera, ni los trámites medioambientales y legales que podría incurrir la implementación de esta tecnología.

Este estudio muestra que el éxito de estas tecnologías está ligado a la economía de escala y a que las políticas nacionales y programas de energía incluyan y persistan con subsidios e incentivos tributarios para este tipo de alternativas, y que estos sean respaldados con idoneidad y rigor por especialistas que realicen los estudios de planeación y vigilancia tecnológica pertinentes para llevar al éxito la implementación de estos sistemas en el país.

Rererencias Bibliográficas

- Abdel-Aal, M., Smits, R., Mohamed, M., De Gussem, K., Schellart, A., & Tait, S. (2014). Modelling the viability of heat recovery from combined sewers. *Water Sci Technol*, 70(2), 297-306. doi:10.2166/wst.2014.218
- Agency, I. E. (2012). *World Energy Outlook 2012*.
- Agency, I. E. (2015). *Heat Sources*. Retrieved from <http://heatpumpingtechnologies.org/>
- Ambiente, M. d. M. (2015). Resolución No. 0631 de 2015. Retrieved from http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res_631_marz_2015.pdf
- Andrews, R., & Pearce, J. M. (2011). Environmental and economic assessment of a greenhouse waste heat exchange. *Journal of Cleaner Production*, 19(13), 1446-1454. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.04.016>
- Aye, L. (2007). Heat Pumps. In B. L. Capehart (Ed.), *Encyclopedia of Energy Engineering and Technology* (Third ed., Vol. 3, pp. 814 - 821): CRC Press.
- Badia Constantí, J. (2013). Heat recovery study from the sewage of sportive complexes.
- Cengel, Y. A. (2007). *Heat and Mass Transfer: A Practical Approach* (M. Hill Ed.). New York.
- Cipolla, S. S., & Maglionico, M. (2014). Heat recovery from urban wastewater: analysis of the variability of flow rate and temperature in the sewer of Bologna, Italy. *Energy procedia*, 45, 288-297.
- Culha, O., Gunerhan, H., Biyik, E., Ekren, O., & Hepbasli, A. (2015). Heat exchanger applications in wastewater source heat pumps for buildings: A key review. *Energy and Buildings*, 104, 215-232.
- Chen, W.-Y. (2012). *Handbook of climate change mitigation*: Springer.
- DWA. (2008). *Energie aus Abwasser - Wärme und Lageenergie Leaflet DWA-M 114*.
- Economics, T. (2017). Colombia - Tasa de Interés. Retrieved from <https://es.tradingeconomics.com/colombia/interest-rate>
- Elías-Maxil, J., van der Hoek, J. P., Hofman, J., & Rietveld, L. (2014). Energy in the urban water cycle: Actions to reduce the total expenditure of fossil fuels with emphasis on heat reclamation from urban water. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 808-820.
- F Pamminger, D. S., L Aye, R Jelbert. (2013). Heat Energy Recovery Potential from Sewers in Melbourne. *AWA(7)*, 40.
- Frijns, J., Hofman, J., & Nederlof, M. (2013). The potential of (waste) water as energy carrier. *Energy Conversion and Management*, 65, 357-363.
- Fuchs, L., & Beeneken, T. (2005). Development and implementation of a real-time control strategy for the sewer system of the city of Vienna. *Water science and technology*, 52(5), 187-194.
- GmbH, U. K. (2011). *Recycled and Reutilised Heat Energy From Sewer Flows Aids Carbon*

- Reduction Fight. UNITRACC.
- Gray, R. (2013). Sewers to be used to heat homes.
- Gruber, G., Winkler, S., & Pressl, A. (2005). Continuous monitoring in sewer networks an approach for quantification of pollution loads from CSOs into surface water bodies. *Water science and technology*, 52(12), 215-223.
- Hickland, B. (2015). Modern Heat Exchanger Technology From Germany an Export Product. In UHRIG (Ed.), *Therm-Liner*.
- HUBER. (2017). HUBER solution for Heat Recovery from the Wastewater Treatment Plant Effluent. *Waste Water Solutions*. Retrieved from <http://www.huber.de/solutions/heating-and-cooling-with-wastewater/heat-from-wwtp-effluent.html>
- Jan Sievers, J. L., Andrea Stubler, Dominik Bestenlehner, Harald Druck, Wenke Schonfelder. (2014). Heat recovery potencial of domestic grey water in the pilot project Jenfelder Au Hamburg. Paper presented at the 17th EWA Symposium during IFAT 2014, Munich, Germany, 5-9 May 2014 Water, Energy and Resources: Innovative Options and Sustainable Solutions Session 4: Energy and Resources in New Sanitation Approaches – Part Two, Stuttgart, Germany.
- Kaufman, R. (2012). Waste Wattage: Cities Aim to Flush Heat Energy Out of Sewers. *National Geographic News*.
- Kretschmer, F., Simperler, L., & Ertl, T. (2016). Analysing wastewater temperature development in a sewer system as a basis for the evaluation of wastewater heat recovery potentials. *Energy and Buildings*, 128, 639-648.
- Lee, M. (2015). A case of Study of Vancouver's Neighborhood Energy Utility. *Future Economy*.
- Lettinga, G., Rebac, S., & Zeeman, G. (2001). Challenge of psychrophilic anaerobic wastewater treatment. *TRENDS in Biotechnology*, 19(9), 363-370.
- Luccio, M. (2012). Sewer Heat Recovery Provides Low-Cost Recycled Energy.
- Markham, D. (2014). Next-generation heat exchanger recovers heat from shower drains to preheat water. *Treehugger*.
- Meggers, F., & Leibundgut, H. (2011). The potential of wastewater heat and exergy: Decentralized high-temperature recovery with a heat pump. *Energy and Buildings*, 43(4), 879-886. doi:10.1016/j.enbuild.2010.12.008
- Niphuis, S. (2013). Transporting Industrial Waste Heat. (Master Programme Energy and Environmental Sciences Master Deegre), University of Groningen, Groningen - Netherlands. (EES 2013-167)
- Rabtherm, A. (2010). Energy from wastewater in recovery energy systems. In R. e. system (Ed.).
- Recovery, M. H. (2015). Drain Water Heat Recovery. Retrieved from <http://www.meanderhr.com/>
- Richard Ashley, P. H. (2002). Sewer Systems and Performance Indicators into the 21st Century. *UrbanWater*.
- Rulkens, W. (2007). Sewage sludge as a biomass resource for the production of energy: overview and assessment of the various options. *Energy & Fuels*, 22(1), 9-15.
- Schmid, F. (2008). Sewage water: interesting heat source for heat pumps and chillers. Paper presented at the 9th International IEA Heat Pump Conference, Switzerland. Paper.
- Shahryar Garmsiri, S. K., Marc A. Rosen. (2014). Recovery from Sewer Waste Heat vs Heat Pumps. Paper presented at the World Sustainability Forum 2014. <http://sciforum.net/conference/wsf-4>

Siemens. (2012). Siemens wins German Industry's Innovation Award. Retrieved from <https://www.siemens.com/press/en/events/2012/energy/2012-02-sgt5-8000h.php>

Tassou, S. (1988). Heat recovery from sewage effluent using heat pumps. Heat Recovery Systems and CHP, 8(2), 141-148.

Uhrig. (2015). Therm-Liner System. In UHRIG (Ed.).

UPME. (2016). Plan de Acción Indicativo de Eficiencia Energética 2017 - 2022. Retrieved from <http://biblioteca.upme.gov.co/>.

van der Hoek, J. (2011). Energy from the water cycle: a promising combination to operate climate neutral. Water Practice and Technology, 6(2), wpt2011019.

Vancouver, C. o. (2017). How the utility works. Water, Sewer and Energy. Retrieved from <http://vancouver.ca/home-property-development/how-the-utility-works.aspx>

Waste & Water Treatment. (2011). Taking The Heat Out. edie.

YCharts. (2015). European Union Natural Gas Import Price. Retrieved from http://ycharts.com/indicators/europe_natural_gas_price

Zhao, X., Fu, L., Zhang, S., Jiang, Y., & Lai, Z. (2010). Study of the performance of an urban original source heat pump system. Energy Conversion and Management, 51(4), 765-770.